

Research Paper

مقاله پژوهشی

## Study on the Ability of *Scenedesmus Obliquus* in the Bio-Removal of Polyethylene Microplastics from Aquatic Environments and Optimization of the Bio-removal Effective Parameters

## امکان سنجی توانایی ریز جلبک سندسموس آبلیکوس در حذف زیستی میکروپلاستیک پلی اتیلن از محیط آبی و بهینه سازی پارامترهای مؤثر بر حذف زیستی

Seyyed Hesam Sharif Vaghefi<sup>1</sup>, Roya Mafigholami<sup>2\*</sup>, Omid Tavakoli<sup>3</sup> and Hamid Moghimi<sup>4</sup>

سیدحسام شریف‌واقفی<sup>۱</sup>، رویا مافی غلامی<sup>۲\*</sup>، امید توکلی<sup>۳</sup> و حمید مغمیمی<sup>۴</sup>

1- PhD Student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

2- Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۲- دانشیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

3- Assistant Professor, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

۳- استادیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

4- Associate Professor, Department of Microbiology, School of Biology, University of Tehran, Tehran, Iran.

۴- دانشیار گروه میکروبیولوژی، دانشکده زیست‌شناسی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\*Corresponding Author, Email: [r.mafigholami@wtiau.ac.ir](mailto:r.mafigholami@wtiau.ac.ir)

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [r.mafigholami@wtiau.ac.ir](mailto:r.mafigholami@wtiau.ac.ir)

Received: 14/12/2024

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

Revised: 06/03/2025

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶

Accepted: 13/07/2025

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

Accepted: 26/05/2025

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

### Abstract

### چکیده

Microplastics refer to plastic particles with a diameter of less than 5 mm, which create significant environmental problems due to their small size, the lack of sufficient technology for removal, and the potential to cause side effects. The microalga *scenedesmus obliquus* has the ability to secrete ligninolytic enzymes and exopolysaccharides, enabling it to degrade microplastics and utilize them as a carbon source. In the present study, by optimizing the cultivation conditions of *scenedesmus obliquus*, the growth rate of the microalgae was enhanced, and subsequently, the feasibility of polyethylene microplastics bioremoval and the effects of various parameters on this process were investigated. According to the results obtained, the highest percentage of polyethylene microplastic removal was achieved at an optical density of 1 for *scenedesmus*, a stirring speed of 150 rpm, and a microplastic size of 45  $\mu\text{m}$ . Gel chromatography analysis showed that the molecular weight of the microplastic decreased by approximately 14% after bioremoval process. Additionally, FTIR analysis indicated that the removal of the carbonyl functional group in the wavelength range of 1400-1600 nm could be considered as a factor confirming the bioremoval of polyethylene microplastics.

میکروپلاستیک‌ها به ذرات پلاستیکی با قطر کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر گفته می‌شود که به دلیل کوچک بودن، عدم وجود فناوری کافی در حذف و همچنین پتانسیل ایجاد عوارض جانبی، مشکلات محیط‌زیستی عمده‌ای ایجاد می‌کنند. ریزجلبک سندسموس آبلیکوس به دلیل توانایی ترشح آنزیم‌های لیگنینولیتیک و آگزوپلی ساکارید قابلیت تجزیه میکروپلاستیک‌ها و مصرف آن به‌عنوان منبع کربنی را دارد. در مطالعه حاضر با بهینه‌سازی شرایط کشت ریزجلبک سندسموس آبلیکوس، رشد ریزجلبک بهینه‌شده و در ادامه امکان‌سنجی حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن و تأثیر پارامترهای مؤثر بر حذف زیستی پلی‌اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس بررسی شد. با توجه به نتایج، بالاترین درصد حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در چگالی نوری سندسموس ۱، سرعت هم‌زدن ۱۵۰ دور بر دقیقه و اندازه میکروپلاستیک ۴۵ میکرومتر به‌دست آمد. آنالیز ژل کروماتوگرافی نشان داد که وزن مولکولی میکروپلاستیک پس از حذف زیستی حدود ۱۴٪ کاهش یافت. همچنین آنالیز FTIR نشان داد که حذف گروه عاملی کربونیل در محدوده طول موج ۱۴۰۰-۱۶۰۰ نانومتر می‌تواند به‌عنوان امان تأیید حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن مورد توجه قرار گیرد.

**Keywords:** Bioremoval, Design Expert, Microalgae, Microplastic, Polyethylene.

**کلمات کلیدی:** پلی‌اتیلن، حذف زیستی، ریزجلبک، طراحی آزمایش، میکروپلاستیک.

پلاستیکی است. بسیاری از کشورها و سازمان‌ها مجبور به صرف هزینه‌های بالا برای جمع‌آوری و تصفیه آب‌های آلوده به میکروپلاستیک هستند. همچنین، این آلودگی‌ها می‌توانند به کاهش کیفیت منابع آب و محصولات کشاورزی منجر شوند که در نهایت تأثیر منفی بر امنیت غذایی و سلامت جامعه دارد (Magalhães et al., 2020). اگرچه میکروپلاستیک‌ها در محیط شناسایی می‌شوند، اما در مورد خطرات آن‌ها مطالعات کافی وجود ندارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در ارزیابی خطرات این ذرات بر روی انسان و محیط‌زیست، متغیر بودن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، ترکیب و غلظت آن‌ها است. علاوه بر آن، شناسایی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی کار دشواری است و روش‌های استاندارد برای آن تعریف نشده است (Prata et al., 2021).

میکروپلاستیک‌ها به‌طور کلی به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. میکروپلاستیک‌های اولیه، قطعات ریز پلاستیکی هستند که به‌طور هدفمند در اندازه کوچکی ساخته می‌شوند. این میکروپلاستیک‌ها معمولاً در پاک‌کننده‌های صورت و لوازم آرایشی و در برخی موارد، در پزشکی به‌عنوان حامل دارو استفاده شده‌اند. به‌عنوان مثال، گلوله‌های پلاستیکی، به‌عنوان مواد اولیه برای ساخت محصولات پلاستیکی و میکروبیدها، در کالاهای مراقبت از سلامت انسان به‌کار رفته‌اند (Wu et al., 2022). گلوله‌های پلاستیکی از پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌استایرن (PS) و ذرات پلی‌الفین تشکیل شده و ماهیتی چربی‌دوست دارند؛ یعنی به‌راحتی مواد شیمیایی مضر و سمی را از آب اطراف سطح خود جذب می‌کنند (An et al., 2020).

میکروپلاستیک‌های ثانویه، قطعات کوچک پلاستیکی هستند که از تجزیه زباله‌های پلاستیکی بزرگ‌تر، هم در دریا و هم در خشکی به‌دست می‌آیند. با گذشت زمان، اوج گرفتن تخریب فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی و همچنین اکسیداسیون نوری ناشی از قرار گرفتن در معرض نور خورشید، می‌تواند یکپارچگی ساختاری زباله‌های پلاستیکی را به اندازه‌ای کاهش دهد که در نهایت با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نباشد. یکی از عوامل تخریب پلاستیک‌ها به قطعات کوچک‌تر، فرآیند تخریب نوری توسط اشعه ماورای بنفش نور خورشید است که منجر به شکستن پیوند شیمیایی پلیمری از طریق فرآیند اکسیداسیون می‌شود. همچنین هوا نیز باعث تجزیه پلاستیک‌های بزرگ به قطعات کوچک می‌شود (Cutroneo et al., 2020).

در حال حاضر، از میان پلاستیک‌ها بیش‌ترین تقاضا به‌ترتیب مربوط به پلی‌اتیلن (۳۶٪)، پلی‌پروپیلن (۲۱٪)، پلی‌وینیل کلراید (۱۲٪) و بقیه برای پلی‌استایرن، پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌اورتان و

استفاده از پلاستیک در جامعه امروزی مزایای بسیاری برای سلامت انسان و محیط‌زیست دارد. بسته‌بندی‌های پلاستیکی باعث جلوگیری از هدررفتن مواد غذایی و آلوده شدن آن‌ها شده و در نتیجه موجب صرفه‌جویی در منابع می‌شود. وزن سبک بسته‌بندی‌های پلاستیکی در مقایسه با سایر مواد نفتی باعث کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل و نقل می‌شود. مواد پلاستیکی با چگالی کم، جایگزین قطعات فلزی در اتومبیل و هواپیما شده است که مصرف سوخت و انتشار آلودگی را کاهش می‌دهد. لباس‌های حفاظت فردی و تجهیزات ایمنی مانند کلاه، کیسه‌های هوا و غیره مانعی در مقابل صدمه به انسان هستند (Boucher and Friot, 2017). همچنین در علم پزشکی از پلاستیک برای تولید کیسه‌های خون، لوله‌ها، سرنگ‌های یک‌بار مصرف و پروتزها استفاده می‌شود. با وجود مزایای زیاد پلاستیک‌ها، افزایش تولید آن طی سال‌های اخیر موجب تولید انبوهی از زباله‌های پلاستیکی در محیط‌زیست شده که دوام، ماندگاری و سرعت پایین بازیافت آن‌ها موجب بروز معضلات محیط‌زیستی شده است. امروزه حضور این مواد در محیط‌زیست، به‌عنوان آلاینده‌های نوظهور شناخته شده و در محیط‌های آبی در سراسر جهان یافت می‌شوند (Yu et al., 2018).

پلاستیک‌ها به‌دلیل دفع غیرسیستماتیک وارد محیط‌های آبی شده و تأثیرات نامطلوبی بر روی حیات موجودات دریایی می‌گذارند که طی چند دهه اخیر این موضوع، نگرانی‌های زیادی را به‌وجود آورده است. این مواد پلاستیکی با روش‌های مختلف تخریب شده و استحکام ساختاری خود را از دست می‌دهند. تخریب گسترده پلاستیک‌ها در نهایت منجر به ایجاد قطعات و تکه‌های مختلف پودری یا پلاستیک‌هایی با اندازه میکروسکوپی می‌شود که میکروپلاستیک نامیده می‌شوند (Chia et al., 2021).

میکروپلاستیک‌ها معمولاً به‌عنوان پلاستیک‌هایی با قطر کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر تعریف می‌شوند که به‌دلیل کوچک بودن، عدم وجود فناوری کافی در حذف و همچنین پتانسیل ایجاد عوارض جانبی، از اهمیت بیش‌تری برخوردارند. یکی از مهم‌ترین مضرات میکروپلاستیک‌ها، تأثیر منفی آن‌ها بر اکوسیستم‌های آبی است. این ذرات می‌توانند به‌راحتی توسط موجودات دریایی بلعیده شوند و در زنجیره غذایی تجمع یابند. با ورود این ذرات به بدن موجودات زنده، خطراتی برای سلامت آن‌ها ایجاد می‌شود و در نهایت ممکن است به انسان‌ها نیز منتقل شوند. از دیگر معایب میکروپلاستیک‌ها، هزینه‌های اقتصادی ناشی از پاک‌سازی و مدیریت آلودگی‌های

میکروپلاستیک‌ها نرخ رشد بالاتری در مقایسه با جلبک در شرایط رشد عادی دارند (Cunha et al., 2019).

سندسموس آبلیکوس یک جلبک تک‌سلولی سبز متعلق به شاخه کلروفیتا بوده که در اکثر منابع آب شیرین یافت می‌شود. سندسموس آبلیکوس توانایی فتوسنتز بالایی داشته و از طرفی پتانسیل جذب کربن زیادی دارد. از طرفی سندسموس به‌دلیل توانایی ترشح آنزیم‌های لیگنینولیتیک و آگزوپلی ساکارید قابلیت تجزیه میکروپلاستیک‌ها و مصرف آن به‌عنوان منبع کربنی را دارد (Silambarasan et al., 2023).

میزان زیست‌توده فعال جلبک در فرآیند حذف زیستی میکروپلاستیک‌ها پارامتر مؤثری بوده و تأثیر مستقیمی بر راندمان حذف دارد. در مطالعه حاضر با بهینه‌سازی شرایط کشت ریزجلبک سندسموس آبلیکوس، رشد ریزجلبک بهینه شده و در ادامه امکان‌سنجی حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن و تأثیر پارامترهای مؤثر بر حذف زیستی پلی‌اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد و تجهیزات

در مطالعه حاضر استوک سندسموس آبلیکوس از بانک ملی جلبک ایران تهیه شده و برای کشت از محیط کشت BG-11 مطابق با جدول ۱ استفاده شد (López-Pacheco et al., 2021).

جدول ۱- اجزای شیمیایی محیط کشت BG-11

غلظت (گرم بر لیتر)	ترکیب شیمیایی
۱/۵	NaNO <sub>3</sub>
۰/۰۷۵	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
۰/۰۳۶	CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O
۰/۰۲	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
۱/۰	Trace Metal Mixture
۰/۰۴	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>
۰/۶	Citric acid
۰/۶	Ferric ammonium citrate

کلیه مواد مورد نیاز محیط کشت از شرکت مرک آلمان تهیه شد. محیط کشت و کلیه لوازمی که در کشت جلبک مورد استفاده قرار گرفتند در اتوکلاو با فشار ۱/۵ اتمسفر معادل دمای ۱۲۱ °C به مدت ۱۵ دقیقه استریل شدند. تمامی مراحل کار در زیر هود بیولوژیکی و در کنار شعله با رعایت دقیق شرایط استریل انجام شد. پلاستیک پلی‌اتیلن کم‌چگالی (LDPE) محصول شرکت آریاساسول به شکل گرانول تهیه شده، با استفاده از آسیاب

سایر پلیمرها است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نوع پلیمرهای شناسایی‌شده در محیط آبی نیز مطابق با بیش‌ترین تقاضای این پلاستیک‌ها است (Geyer et al., 2017).

در سال‌های اخیر روش‌های مختلف و متعددی برای حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط‌زیست پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گرفته است. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به انعقاد و لخته‌سازی، هضم بیولوژیکی و شیمیایی، روش‌های تجزیه‌ای و تخریبی و همچنین فرآیندهای غشایی اشاره نمود. این روش‌ها هر کدام مزایا و معایب خاص خود را داشته و انتخاب روش حذف به عواملی مانند مورفولوژی، پارامترهای محیطی، چگالی و نوع محیط آبی وابسته است (Park and Park, 2021). با این حال اکثر روش‌های مورد استفاده برای حذف میکروپلاستیک‌ها شامل روش‌های سطح اول به معنی بازگرداندن ضایعات پلاستیکی به چرخه گرمایش پلاستیک برای بازیافت و تبدیل زباله‌های پلاستیکی به محصولات پلاستیکی جدید بوده و عملاً موجب تجزیه و حذف میکروپلاستیک از محیط نمی‌شود (Iyare et al., 2020).

در سال‌های اخیر استفاده از فناوری‌های زیستی برای حذف میکروپلاستیک به‌عنوان روشی مقرون‌به‌صرفه، پایدار، کارآمد و دوست‌دار محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است (Miloloža et al., 2022). تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها مبتنی بر هیدرولیز آنزیمی بوده، لذا راندمان حذف زیستی میکروپلاستیک به گونه‌های بیولوژیکی استفاده‌شده برای تجزیه زیستی وابسته است. از جمله سایر عوامل مؤثر بر افزایش راندمان حذف زیستی توانایی تشکیل کلنی بر روی ساختار میکروپلاستیک بوده که با توجه به مطالعات ریزجلبک‌ها قابلیت بالایی برای تشکیل این کلنی‌ها دارند (Priya et al., 2022). از طرفی میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان منبع کربن می‌تواند مورد استفاده جلبک‌ها قرار گرفته و میکروپلاستیک در فرآیند حذف زیستی به‌طور کامل توسط جلبک مصرف شود (Hadian-Ghazvini et al., 2022).

مطالعات نشان می‌دهد که جلبک‌ها توانایی تغذیه از میکروبیوم کلونیزه‌شده روی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن را داشته، کربن را از ساختار میکروپلاستیک پلی‌اتیلن جدا کرده و به اسیدهای چرب غیراشباع در ساختار سلول خود تبدیل می‌کند (Fan et al., 2024). هم‌چنین جلبک‌ها علاوه بر فتوسنتز قادر به استفاده از مواد آلی به‌عنوان منبع انرژی بوده و در نتیجه با غلبه بر افت انرژی ناشی از کاهش فتوسنتز و حتی افزایش بهره‌وری انرژی نسبت به سایر گونه‌ها، انرژی لازم برای رشد و گسترش خود را فراهم می‌سازند. هم‌چنین جلبک‌های کلونیزه‌شده روی

اسید نیتریک ۱ مولار به میزان ۱۰ درصد و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد هیدرولیز شده و ذرات میکروپلاستیک باقی‌مانده با استفاده از فیلتر غشایی از نمونه‌ها جداسازی و وزن شد. درصد حذف میکروپلاستیک در هر نمونه محاسبه شد و نتایج آزمایش بهینه‌سازی شد.

تغییر در پیوندها و گروه‌های عاملی پلی‌اتیلن پیش و پس از حذف زیستی با استفاده از آنالیز FTIR تعیین و مورد بررسی قرار گرفت (FT-IR/NIR FRONTIER-USA). برای بررسی تغییر وزن مولکولی پلی‌اتیلن پس از حذف زیستی از آنالیز کروماتوگرافی نفوذ ژل (GPC) با استفاده از Agilent 1260 DAD VL+) Infinity Binary LC مجهز به آرایه دیود (1260/G1315C) به همراه دو آشکارساز فلورسانس (1260/G1321B) استفاده شد.

### ۲-۳- طراحی آزمایش

برای بررسی شرایط بهینه حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن با استفاده از ریزجلبک سندسموس آبلیکوس، طراحی آزمایش با استفاده از متد سطح پاسخ (RSM) و طراحی مرکزی (CCD) انجام شد. برای طراحی آزمایش سه پارامتر غلظت جلبک براساس چگالی نوری (OD)، اندازه میکروپلاستیک و سرعت هم‌زدن در سه سطح تعریف شده ( $\alpha = 1$ ) و تعداد نقاط مرکزی ۳ در نظر گرفته شد. طراحی آزمایش، آنالیز واریانس و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert Version 10.0.7.0 انجام شد. آزمایش‌های تعیین‌شده پس از طراحی آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

سیاره‌ای در ابعاد میکرومتری متناسب با پارامترهای آزمایش خرد شده و ذرات میکروپلاستیک در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۲- طراحی و اجرای آزمایش

جلبک سندسموس در ارلن‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری تحت دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در انکوباتور شیکردار کشت داده شد. میزان تلقیح اولیه جلبک به محیط کشت ۱۰٪ بوده و نور به‌میزان ۳۵۰۰ لوکس با استفاده از لامپ فلوروسنت سفید تأمین شد. میزان رشد روزانه جلبک در نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شده و نمونه‌های میکروپلاستیک با غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر در چگالی نوری موردنظر (متناسب با طراحی آزمایش) به نمونه‌ها اضافه شد. با توجه به بررسی سایر مطالعات و در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر حذف زیستی، در مطالعه حاضر پارامترهای چگالی نوری جلبک (تراکم سلولی)، اندازه میکروپلاستیک پلی‌اتیلن و سرعت هم‌زدن نمونه‌ها به‌عنوان پارامترهای مؤثر آزمایش در نظر گرفته شد و پس از طراحی آزمایش، آزمایش‌ها انجام شد. در این پژوهش، حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن با استفاده از ریزجلبک سندسموس در محدوده چگالی نوری ۰/۲ تا ۱، اندازه میکروپلاستیک در محدوده ۴۵ تا ۱۰۵ میکرومتر و سرعت هم‌زدن در محدوده ۱۵۰ تا ۲۰۰ دور بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. ذرات میکروپلاستیک با غلظت و ابعاد مشخص در ابتدای شروع فرآیند کشت به نمونه‌ها اضافه شده، جلبک در حضور میکروپلاستیک رشد کرده و فرآیند حذف زیستی انجام شد. پس از اتمام فرآیند حذف بیولوژیکی، نمونه‌ها با استفاده از

جدول ۲- طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ

ردیف	چگالی نوری	دور میکسر (rpm)	اندازه میکروپلاستیک (um)
۱	۱	۲۰۰	۴۵
۲	۰/۱۶	۱۵۰	۷۵
۳	۱	۱۵۰	۱۰۵
۴	۰/۲	۲۰۰	۴۵
۵	۰/۱۶	۲۰۰	۷۵
۶	۱	۱۷۵	۷۵
۷	۱	۲۰۰	۱۰۵
۸	۰/۲	۲۰۰	۱۰۵
۹	۰/۱۶	۱۷۵	۷۵
۱۰	۰/۱۶	۱۷۵	۴۵
۱۱	۱	۱۵۰	۴۵
۱۲	۰/۲	۱۵۰	۴۵
۱۳	۰/۱۶	۱۷۵	۷۵
۱۴	۰/۱۶	۱۷۵	۷۵
۱۵	۰/۲	۱۵۰	۱۰۵
۱۶	۰/۲	۱۷۵	۷۵
۱۷	۰/۱۶	۱۷۵	۱۰۵

### ۳- نتایج و بحث

حذف میکروپلاستیک توسط ریزجلبک مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به طراحی آزمایش، تعداد ۱۷ تست انجام شد و نتایج حذف زیستی در جدول ۳ آورده شده است.

پس از کشت جلبکها و رسیدن به چگالی نوری مورد نظر، نمونه های میکروپلاستیک به ارلن های کشت جلبک اضافه شده و

جدول ۳- راندها حذف زیستی میکروپلاستیک پلی اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس

ردیف	چگالی نوری	دور میکسر (rpm)	اندازه میکروپلاستیک (um)	حذف میکروپلاستیک (%)
۱	۱	۲۰۰	۴۵	۳۶/۱۱
۲	۰/۶	۱۵۰	۷۵	۲۱/۰۴
۳	۱	۱۵۰	۱۰۵	۱۸/۷۲
۴	۰/۲	۲۰۰	۴۵	۲۵/۱۵
۵	۰/۶	۲۰۰	۷۵	۲۰/۴۹
۶	۱	۱۷۵	۷۵	۲۹/۰۲
۷	۱	۲۰۰	۱۰۵	۱۸/۳۴
۸	۰/۲	۲۰۰	۱۰۵	۱۱/۶۵
۹	۰/۶	۱۷۵	۷۵	۲۵/۷۳
۱۰	۰/۶	۱۷۵	۴۵	۳۲/۸۶
۱۱	۱	۱۵۰	۴۵	۳۹/۸۳
۱۲	۰/۲	۱۵۰	۴۵	۲۴/۸۷
۱۳	۰/۶	۱۷۵	۷۵	۲۵/۵۷
۱۴	۰/۶	۱۷۵	۷۵	۲۶/۰۵
۱۵	۰/۲	۱۵۰	۱۰۵	۱۲/۰۸
۱۶	۰/۲	۱۷۵	۷۵	۱۷/۹۹
۱۷	۰/۶	۱۷۵	۱۰۵	۱۶/۹۲

حذف زیستی میکروپلاستیک، مدل سازی نتایج با استفاده از مدل Quadratic و بدون اعمال رابطه توانی انجام شد. با توجه به جدول آنالیز واریانس (جدول ۴)، مدل از نظر آماری معنادار بوده ( $Pvalue < 0.05$ ) و مقدار  $R^2$  برابر با ۰/۹۸ به دست آمد که بیانگر انطباق بالای مدل با داده های واقعی است.

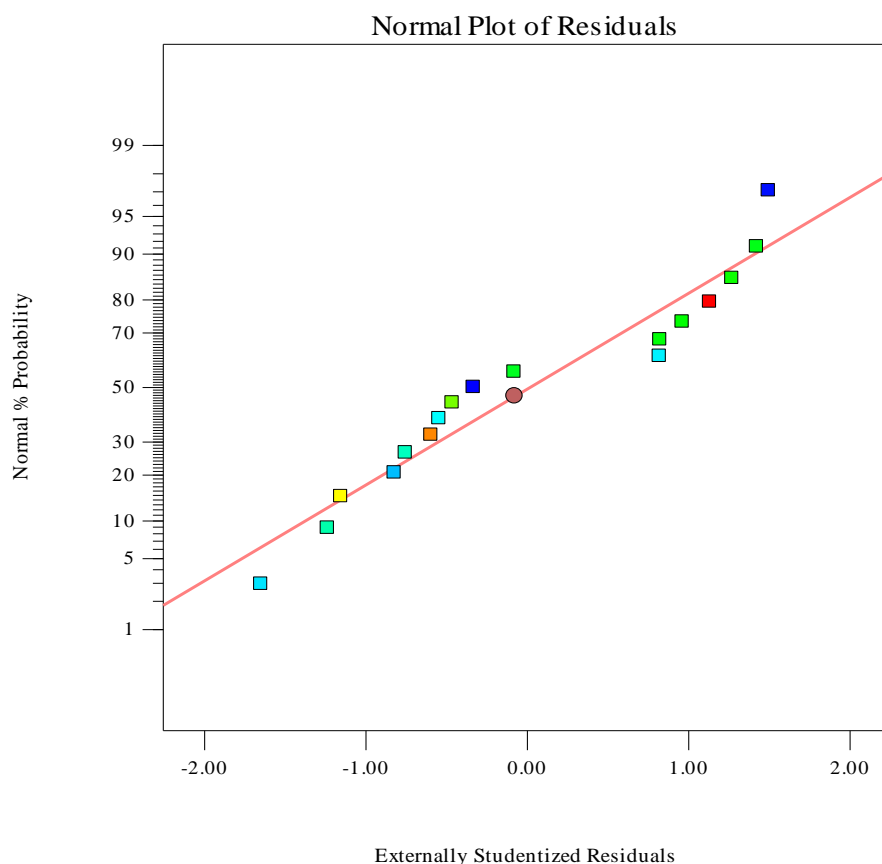
با توجه به نتایج به دست آمده، بالاترین درصد حذف میکروپلاستیک پلی اتیلن در چگالی نوری ۱، سرعت هم زدن ۱۵۰ دور بر دقیقه و اندازه میکروپلاستیک ۴۵ میکرومتر به دست آمده است. با توجه به جدول ۳، در این شرایط ۳۹/۸۳ درصد از میکروپلاستیک پلی اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس حذف شده است. برای بررسی اثر پارامترهای آزمایش بر راندها

جدول ۴- آنالیز واریانس نتایج حذف زیستی پس از مدل سازی آماری

منبع	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F-value	P-value	درجه اهمیت
Model	58.6051	9	106.5117	52.89636	1.31E-05	با اهمیت
A-OD	252.8078	1	252.8078	125.5507	1.01E-05	
B-Shaking speed	2.304	1	2.304	1.144224	0.320253	
C-Microplastyic size	657.8832	1	657.8832	326.7212	3.92E-07	
AB	1.950313	1	1.950313	0.968574	0.357822	
AC	19.81351	1	19.81351	9.839885	0.016451	
BC	0.864613	1	0.864613	0.429388	0.533224	
A <sup>2</sup>	0.000299	1	0.000299	0.000148	0.990618	
B <sup>2</sup>	20.2701	1	20.2701	10.06664	0.015647	
C <sup>2</sup>	5.061298	1	5.061298	2.513567	0.15689	
Residual	14.09514	7	2.013592			
Lack of Fit	13.97568	5	2.795135	46.79356	0.061055	بی اهمیت
Pure Error	0.119467	2	0.059733			
Cor Total	972.7002	16				

به دست آمده رابطه (۱) برای بیان مدل به دست آمد.

بررسی نمودار نرمال پلات (شکل ۱) نیز نشان دهنده توزیع مناسب داده‌ها حول خط نرمال بوده و با توجه به نتایج



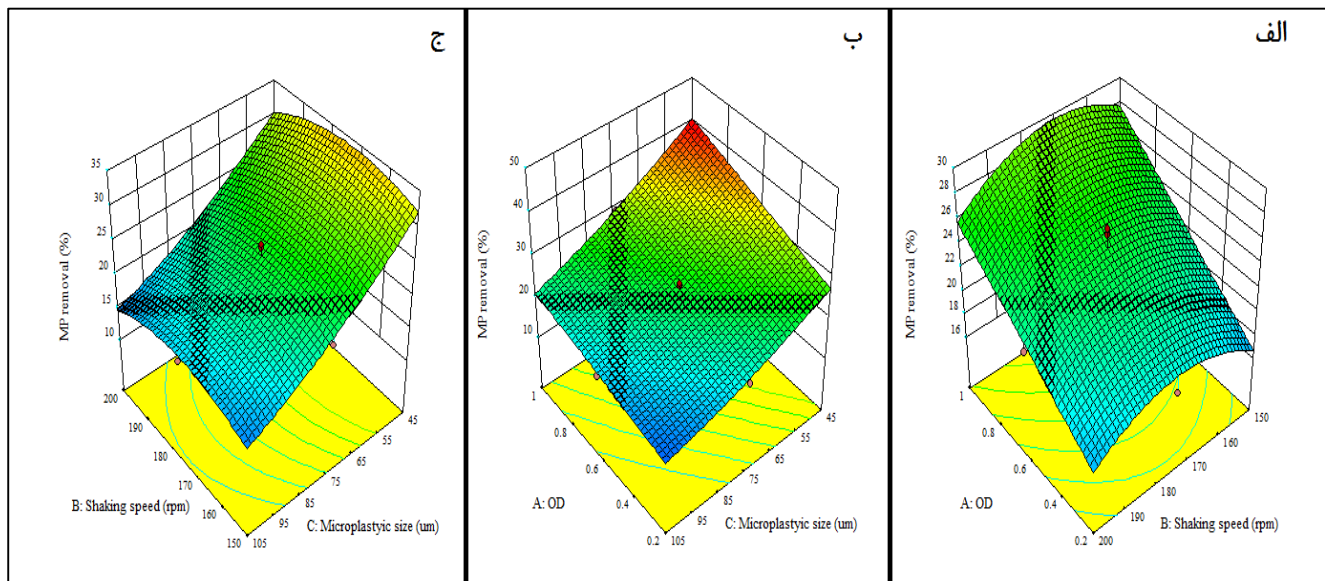
شکل ۱- نمودار نرمال نتایج حذف زیستی میکروپلاستیک پس از مدل سازی

$$MP\ removal = -90.96 + (31.12 \times A) + (1.52 \times B) - (0.49 \times C) - (0.05 \times AB) - (0.13 \times AC) + (0.00043 \times BC) - (0.066 \times A^2) - (0.0044 \times B^2) + (0.0015 \times C^2) \quad (1)$$

سلول‌ها در اثر واپاشی سلولی باشد و از طرف دیگر سرعت هم‌زدن پایین باعث عدم برهم‌کنش مناسب بین سلول‌های جلبک و ذرات میکروپلاستیک می‌شود (Cheng and Wang, 2022). بررسی اثر هم‌زمان اندازه میکروپلاستیک و چگالی نوری در شکل ۲-ب نشان می‌دهد که افزایش اندازه میکروپلاستیک به‌طور معناداری موجب کاهش راندمان حذف زیستی شده و ریزجلبک سندسموس، میکروپلاستیک پلی‌اتیلن با ابعاد کوچک‌تر را بهتر حذف می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن به چگالی نوری (غلظت سلولی) و اندازه میکروپلاستیک وابستگی بالایی داشته و اضافه کردن میکروپلاستیک در ابعاد کوچک به ارلن کشت با غلظت بالا می‌تواند راندمان حذف زیستی را افزایش دهد.

که A: برابر OD، B: سرعت تکان دادن و C: اندازه میکروپلاستیک هستند.

نمودارهای سه‌بعدی اثر برهم‌کنش پارامترها بر راندمان حذف زیستی در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به شکل ۲-الف، افزایش چگالی نوری رابطه مستقیمی با درصد حذف میکروپلاستیک داشته و اضافه کردن میکروپلاستیک به جلبک در غلظت‌های بالا، راندمان حذف بالاتری را به همراه داشته است. از طرفی بررسی اثر سرعت هم‌زدن بر میزان حذف میکروپلاستیک بیانگر این است که شدت‌های پایین هم‌زدن و هم‌چنین شدت‌های بالای هم‌زدن موجب کاهش راندمان حذف زیستی پلی‌اتیلن شده است. دلیل افت راندمان در سرعت بالای هم‌زدن می‌تواند ناشی از ایجاد تنش برای سلول‌های جلبک و در نتیجه از بین رفتن



شکل ۲- بررسی تأثیر هم‌زمان پارامترهای: الف) چگالی نوری و سرعت هم‌زدن؛ ب) چگالی نوری و اندازه میکروپلاستیک؛ و ج) سرعت هم‌زدن و اندازه میکروپلاستیک بر میزان حذف زیستی میکروپلاستیک پلی اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آلیکوس

تواند وابسته به اندازه باشد و میکروپلاستیک‌های با اندازه بزرگ‌تر اثرات نامطلوب قابل توجهی ایجاد می‌کنند. از طرفی میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر استرس اکسیداتیو بیشتری ایجاد کرده و بر عملکردهای سلولی تأثیر می‌گذارند (Li et al., 2023). همچنین مطالعات بیانگر این است که هم‌زدن محیط کشت جلبک تأثیر مثبت بر راندمان حذف دارد. برخی از مطالعات به اثر شدت هم‌زدن بر میزان تشکیل توده سلولی ریزجلبک در اطراف ذرات میکروپلاستیک اشاره کرده و بیان می‌کنند هم‌زدن با سرعت زیاد می‌تواند باعث جلوگیری از تجمع سلولی و کاهش راندمان حذف زیستی شود (Cheng and Wang, 2022; Cunha et al., 2019).

بررسی راندمان حذف پلی اتیلن توسط ریزجلبک در سایر مطالعات نشان می‌دهد که ریزجلبک سندسموس آلیکوس نسبت به سایر گونه‌های میکروجلبک سبز راندمان حذف میکروپلاستیک بالاتری دارد (Su et al., 2023). در پژوهشی بر روی حذف میکروپلاستیک‌های پلی استایرن، پلی متیل متاکریلات و پلی لاکتید مشخص شد که ریزجلبک سندسموس آلیکوس توانایی حذف حدود ۸۵٪ از این میکروپلاستیک‌ها از محیط آبی را داشته و توانایی تجزیه بالاتری را در تماس با پلی متیل متاکریلات نسبت به سایر میکروپلاستیک‌ها نشان می‌دهد (Cheng and Wang, 2022). بررسی‌ها بیانگر این است که مطالعات چندانی بر روی جذب میکروپلاستیک پلی اتیلن توسط ریزجلبک سندسموس آلیکوس انجام نشده است و عمده مطالعات با تمرکز بر حذف میکروپلاستیک پلی استایرن توسط این

بررسی مطالعات مشابه نشان می‌دهد که سلول‌های ریزجلبک در مواجهه با ذرات میکروپلاستیک در اطراف آن تجمع کرده و توده تشکیل می‌دهد (Nava and Leoni, 2021). با توجه به چگالی پایین پلی اتیلن، سلول‌های جلبک، میکروذرات پلی اتیلن را تجزیه کرده و به عنوان منبع کربنی مصرف می‌کنند؛ لذا به نظر می‌رسد شیمی سطح و حالات انرژی روی سطح ریزجلبک‌ها در شروع فرآیند حذف زیستی حیاتی هستند (Sarmah and Rout, 2020). با این وجود برخی مطالعات بیان می‌کنند که بالا بودن میزان تجمع سلول‌های جلبک اطراف میکروپلاستیک چندان تأثیرگذار نبوده و غلظت سلولی تأثیر بیشتری بر راندمان حذف زیستی دارد (Cunha et al., 2020). این نتایج با مطالعه حاضر مطابقت بیشتری را نشان می‌دهد.

بررسی اثر اندازه میکروپلاستیک بر راندمان حذف زیستی بیانگر این است که اندازه ذرات و مدت‌زمان قرار گرفتن میکروپلاستیک در معرض سلول‌های جلبک بر تجمع و حذف زیستی مؤثر است. برخی مطالعات به اثر سایه در فرآیند حذف میکروپلاستیک‌ها اشاره می‌کنند. بر این اساس، ابعاد بزرگ‌تر میکروپلاستیک با ایجاد سایه، باعث کاهش نوردهی به جلبک‌ها شده و راندمان رشد و فتوسنتز جلبک کاهش پیدا می‌کند. این کاهش راندمان رشد بر میزان حذف زیستی تأثیر منفی دارد (Zhang et al., 2017; Wang et al., 2023). همچنین افزایش اندازه میکروپلاستیک باعث ایجاد زنجیره‌های پلیمری قوی‌تری شده که تجزیه آن را برای ریزجلبک‌ها سخت‌تر می‌کند (Cheng and Wang, 2022). علاوه بر این، سمیت میکروپلاستیک‌ها می

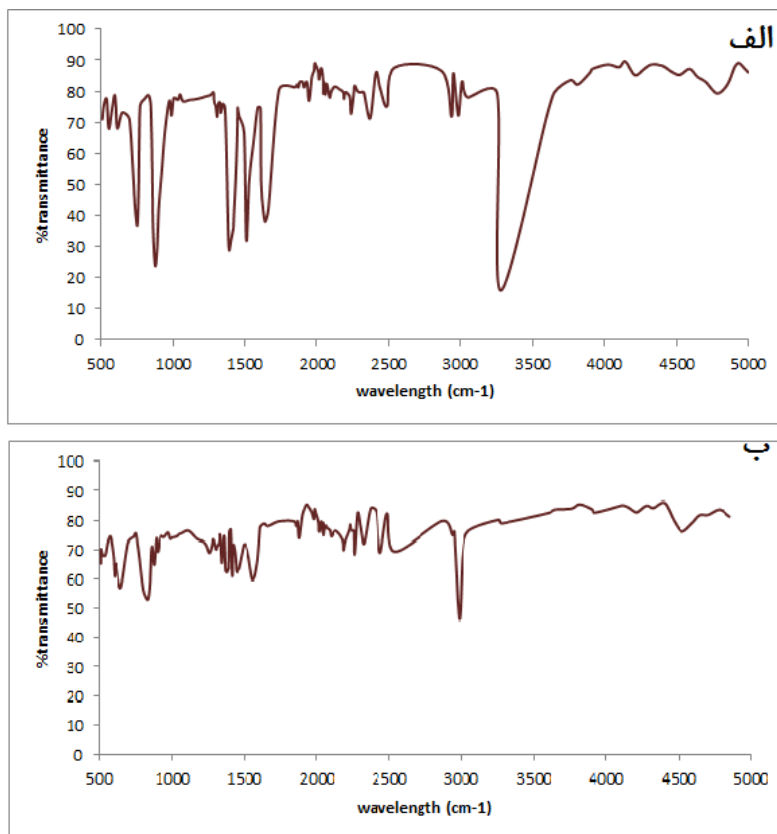
آنالیز FTIR در این پژوهش، با هدف ارزیابی تغییرات در گروه‌های عاملی پلی‌اتیلن قبل و بعد از حذف زیستی (نمونه‌های شاهد و بهینه) با توجه به شکل ۳-الف انجام شد. پلی‌اتیلن در نمونه کنترل توسط گروه‌های عاملی آن شامل کشش  $\text{CH}_2$  در طول موج حدود  $3250\text{ cm}^{-1}$ ، ارتعاش  $\text{C}=\text{C}$  در طول موج  $1400\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$  و پیوندهای  $\text{CH}$  در طول موجهای  $876$  و  $752\text{ cm}^{-1}$  شناسایی شد. شکل ۳-ب نشان می‌دهد که پس از حذف زیستی پلی‌اتیلن با استفاده از ریزجلبک سندسموس، شدت پیوندهای  $\text{CH}_2$  در طول موج حدود  $3250\text{ cm}^{-1}$  کاهش شدت پیوندهای  $\text{CH}_2$  در طول موج  $3250$  نانومتر پس از حذف زیستی نشان‌دهنده تغییراتی در ساختار پلی‌اتیلن است که احتمالاً به دلیل تجزیه یا تغییر در ساختار شیمیایی آن به وجود آمده است. این تغییرات می‌تواند ناشی از فعالیت‌های میکروجلبک باشد که به تجزیه پلیمر کمک می‌کنند. علاوه بر این، در طول موج حدود  $1650\text{ cm}^{-1}$ ، کاهش در شدت گروه کربونیل مشاهده شد که می‌تواند مربوط به آزاد شدن کربن از ساختار میکروپلاستیک باشد. گروه عاملی  $\text{C}=\text{C}$  که در نمونه شاهد در طول موج  $1400\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$  مشاهده شده بود نیز پس از حذف زیستی توسط ریزجلبک سندسموس دچار کاهش شدت شده و پیک آن حذف شده است (Sugimoto et al., 2013; Bhuyar et al., 2021).

جلبک انجام شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های حذف زیستی مطالعه حاضر، بهینه‌سازی نتایج با استفاده از نرم‌افزار Design Expert در محدوده پارامترهای این پژوهش انجام شد. برای بهینه‌سازی نتایج حذف زیستی، تأثیر کلیه پارامترها یکسان در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی با هدف حداکثر میزان حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی در جدول ۵ آورده شده است. براساس جدول ۵، درصد بهینه حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در محدوده پارامترهای آزمایش  $40/41\%$  پیش‌بینی شد که در شرایط چگالی نوری  $0/992$ ، سرعت هم‌زدن  $170$  دور بر دقیقه و اندازه میکروپلاستیک  $45/3$  میکرومتر به دست آمده است.

جدول ۵- بهینه‌سازی حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن در محدوده پارامترهای آزمایش

پارامتر مؤثر	چگالی نوری	سرعت هم‌زدن (دور بر دقیقه)	اندازه (میکرومتر)	درصد حذف
مقدار بهینه	۰/۹۹۲	۱۷۰	۴۵/۳	۴۰/۴۱



شکل ۳- آنالیز FTIR پلی‌اتیلن: الف) قبل؛ و ب) بعد از حذف زیستی توسط ریزجلبک سندسموس آلیکوس

- Bhuyar, P., Sundararaju, S., Feng, H.X., Rahim, M.H.A., Muniyasamy, S., Maniam, G.P., and Govindan, N., (2021), "Evaluation of microalgae's plastic biodeterioration property by a consortium of chlorella sp. and cyanobacteria sp", *Environmental Research, Engineering and Management*, 77(3), 86-98, <https://doi.org/10.5755/j01.arem.77.3.25317>.
- Boucher, J., and Friot, D., (2017), *Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources*, Vol. 10, pp. 1-43, Gland, Switzerland: Iucn. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>.
- Cheng, Y.R., and Wang, H.Y., (2022), "Highly effective removal of microplastics by microalgae scenedesmus abundans", *Chemical Engineering Journal*, 435, 135079, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135079>.
- Chia, R.W., Lee, J.Y., Kim, H., and Jang, J., (2021), "Microplastic pollution in soil and groundwater: A review", *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4211-4224, <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01297-6>.
- Cunha, C., Faria, M., Nogueira, N., Ferreira, A., and Cordeiro, N., (2019), "Marine vs freshwater microalgae exopolymers as biosolutions to microplastics pollution", *Environmental Pollution*, 249, 372-380, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.046>.
- Cunha, C., Silva, L., Paulo, J., Faria, M., Nogueira, N., and Cordeiro, N., (2020), "Microalgal-based biopolymer for nano-and microplastic removal: A possible biosolution for wastewater treatment", *Environmental Pollution*, 263, 114385, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114385>.
- Cutroneo, L., Reboa, A., Besio, G., Borgogno, F., Canesi, L., Canuto, S., Dara, M., Enrile, F., Forioso, I., Greco, G., and Lenoble, V., (2020), "Microplastics in seawater: Sampling strategies, laboratory methodologies, and identification techniques applied to port environment", *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 8938-8952, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07783-8>.
- Fan, X., Kong, L., Wang, J., Tan, Y., Xu, X., Li, M., and Zhu, L., (2024), "Surface-programmed microbiome assembly in phycosphere to microplastics contamination", *Water Research*, 262, 122064, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122064>.
- Geyer, R., Jambeck, J.R., and Law, K.L., (2017), "Production, use, and fate of all plastics ever made", *Science Advances*, 3(7), 1700782, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Hadian-Ghazvini, S., Hooriabadi Saboor, F., and Safae Ardekani, L., (2022), "Bioremediation techniques for microplastics removal", In: *Microplastics Pollution in Aquatic Media: Occurrence, Detection, and Removal*, 327-377, [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8440-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8440-1_15).
- Iyare, P.U., Ouki, S.K., and Bond, T., (2020), "Microplastics removal in wastewater treatment plants: A critical review", *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6(10), 2664-2675, <https://doi.org/10.1039/d0ew00397b>.
- Li, J., Zheng, X., Liu, X., Zhang, L., Zhang, S., Li, Y.,

آنالیز ژل کروماتوگرافی نمونه شاهد، نشان داد که وزن مولکولی پلی‌اتیلن  $26/98 \pm 1/13$  گرم بر مول بود. پس از انجام پروسه حذف زیستی، وزن مولکولی میکروپلاستیک در نمونه بهینه، حدود ۱۴٪ کاهش یافته و به  $23/17$  گرم بر مول رسید. سایر مطالعات نیز کاهش وزن مولکولی را به‌عنوان عاملی برای سنجش میزان تجزیه پلی‌اتیلن گزارش کرده‌اند (Wang et al., 2023).

#### ۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف امکان‌سنجی حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن با استفاده از ریزجلبک سندسموس آبلیکوس و بررسی اثر غلظت جلبک، سرعت هم‌زدن و اندازه ذرات میکروپلاستیک بر راندمان حذف زیستی انجام شد. نتایج نشان داد که حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن وابستگی زیادی به غلظت جلبک و اندازه میکروپلاستیک داشته و افزودن میکروپلاستیک در اندازه‌های کوچک به محیط کشت ریزجلبک سندسموس در غلظت بالا، باعث حذف زیستی بالاتری می‌شود. نتایج نشان داد که در چگالی نوری جلبک برابر با ۱، اندازه میکروپلاستیک ۴۵ میکرومتر و سرعت هم‌زدن ۱۵۰ دور بر دقیقه، درصد حذف میکروپلاستیک پلی‌اتیلن به  $39/83$  رسید. هم‌چنین با بررسی نتایج حاصل از آنالیز FTIR مشخص شد که حذف گروه عاملی کربونیل در محدوده طول موج  $1600-1400$  می‌تواند به‌عنوان المان تأیید حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌اتیلن موردتوجه قرارگیرد. با توجه به نتایج به‌نظر می‌رسد که نیاز است مطالعات بیشتری بر روی اثر پارامترهای سلولی جلبک بر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن صورت‌گیرد و داده‌های کامل‌تری در رابطه با اثر سمیت سلولی، تأثیر مواد پلیمری خارج سلولی ریزجلبک (EPS) و اثر غلظت میکروپلاستیک بر راندمان حذف گردآوری شود. هم‌چنین برای بررسی بیشتر تأثیر اندازه میکروپلاستیک بر راندمان حذف، اثر سایه باید در مطالعات آتی مورد توجه قرارگیرد. از طرفی با توجه به عدم وجود مطالعات کافی در رابطه با مکانیسم‌های حذف زیستی میکروپلاستیک‌ها توسط ریزجلبک، بررسی مکانیسم‌های تجزیه در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

#### ۵- مراجع

- An, L., Liu, Q., Deng, Y., Wu, W., Gao, Y., and Ling, W., (2020), "Sources of microplastic in the environment", In: *Microplastics in Terrestrial Environments: Emerging Contaminants and Major Challenges*, 143-159, Cham: Springer International Publishing.

- Su, Y., Gao, L., Peng, L., Diao, X., Lin, S., Bao, R., and Mehmood, T., (2023), "Heterogeneous aggregation between microplastics and microalgae: May provide new insights for microplastics removal", *Aquatic Toxicology*, 261, 106638, <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106638>.
- Sugimoto, M., Shimada, A., Kudoh, H., Tamura, K. and Seguchi, T., (2013), "Product analysis for polyethylene degradation by radiation and thermal ageing", *Radiation Physics and Chemistry*, 82, 69-73, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.08.009>.
- Wang, C., Liu, Y., Chen, W.Q., Zhu, B., Qu, S., and Xu, M., (2021), "Critical review of global plastics stock and flow data", *Journal of Industrial Ecology*, 25(5), 1300-1317, <https://doi.org/10.1111/jiec.13125>.
- Wang, X., Zhao, Y., Zhao, L., Wan, Q., Ma, L., Liang, J., Li, H., Dong, J., and Zhang, M., (2023), "Effects of microplastics on the growth, photosynthetic efficiency and nutrient composition in freshwater algae *Chlorella vulgaris* Beij", *Aquatic Toxicology*, 261, 106615, <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106615>.
- Wang, Z., Chen, H., Zhang, Y., and Wang, Q., (2023), "Study on the mechanism of molecular weight reduction of polyethylene based on Ferromontmorillonite and its potential application", *Polymers*, 15(6), 1429, <https://doi.org/10.3390/polym15061429>.
- Wu, X., Zhao, X., Chen, R., Liu, P., Liang, W., Wang, J., Teng, M., Wang, X., and Gao, S., (2022), "Wastewater treatment plants act as essential sources of microplastic formation in aquatic environments: A critical review", *Water Research*, 221, 118825, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118825>.
- Yu, Y., Zhou, D., Li, Z., and Zhu, C., (2018), "Advancement and challenges of microplastic pollution in the aquatic environment: A review", *Water, Air and Soil Pollution*, 229, 1-18, <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3788-z>.
- Zhang, C., Chen, X., Wang, J., and Tan, L., (2017), "Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae", *Environmental Pollution*, 220, 1282-1288, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.005>.
- Zhang, W., Li, Q., Zhao, Y., Chen, X., and Wang, X., (2023), "Effect and mechanism of microplastics exposure against microalgae: Photosynthesis and oxidative stress", *Science of the Total Environment*, 905, 167017, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167017>.
- López-Pacheco, I.Y., Castillo-Vacas, E.I., Castañeda-Hernández, L., Gradiz-Menjivar, A., Rodas-Zuluaga, L.I., Castillo-Zacarías, C., Sosa-Hernández, J.E., Barceló, D., Iqbal, H.M., and Parra-Saldívar, R., (2021), "CO<sub>2</sub> biocapture by *Scenedesmus* sp. grown in industrial wastewater", *Science of the Total Environment*, 790, 148222, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148222>.
- Magalhães, S., Alves, L., Medronho, B., Romano, A., and Rasteiro, M.D.G., (2020), "Microplastics in ecosystems: From current trends to bio-based removal strategies", *Molecules*, 25(17), 3954, <https://doi.org/10.3390/molecules25173954>.
- Miloloža, M., Cvetnić, M., Kučić Grgić, D., Ocelić Bulatović, V., Ukić, Š., Rogošić, M., Dionysiou, D.D., Kušić, H., and Bolanča, T., (2022), "Biotreatment strategies for the removal of microplastics from freshwater systems. A review", *Environmental Chemistry Letters*, 20(2), 1377-1402, <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01370-0>.
- Nava, V., and Leoni, B., (2021), "A critical review of interactions between microplastics, microalgae and aquatic ecosystem function", *Water Research*, 188, 116476, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116476>.
- Park, H., and Park, B., (2021), "Review of microplastic distribution, toxicity, analysis methods, and removal technologies", *Water*, 13(19), 2736, <https://doi.org/10.3390/w13192736>.
- Prata, J.C., da Costa, J.P., Lopes, I., Andrady, A.L., Duarte, A.C., and Rocha-Santos, T., (2021), "A one health perspective of the impacts of microplastics on animal, human and environmental health", *Science of the Total Environment*, 777, 146094, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146094>.
- Priya, A.K., Jalil, A.A., Dutta, K., Rajendran, S., Vasseghian, Y., Karimi-Maleh, H., and Soto-Moscoso, M., (2022), "Algal degradation of microplastic from the environment: Mechanism, challenges, and future prospects", *Algal Research*, 67, 102848, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102848>.
- Sarmah, P., and Rout, J., (2020), "Role of algae and cyanobacteria in bioremediation: Prospects in polyethylene biodegradation", In: *Advances in Cyanobacterial Biology*, 333-349, Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819311-2.00022-X>.
- Silambarasan, S., Logeswari, P., Sivaramakrishnan, R., Incharoensakdi, A., Kamaraj, B., and Cornejo, P., (2023), "Scenedesmus sp. strain SD07 cultivation in municipal wastewater for pollutant removal and production of lipid and exopolysaccharides", *Environmental Research*, 218, 115051, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115051>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.